

ДИНАМИКА ПРОЦЕССА РАЗЛОМА ДРЕЙФУЮЩЕГО ЛЕДЯНОГО ПОЛЯ СТАНЦИИ «СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС-38»

д-р. физ.-мат. наук В.Н.СМИРНОВ, науч. сотр. Л.В. ПАНОВ,
рук. ВАЭ В.Т.СОКОЛОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: smirnov@aari.ru

Приводятся результаты исследования физико-механического процесса при сжатии и разломе ледяного поля дрейфующей станции «Северный полюс-38». На основе инструментального мониторинга состояния ледяного покрова получены многомесячные ряды значения скорости, смещения и ускорения льда. Представлены данные о типичном событии, обусловленном взаимодействием льдов, при котором возникали первичные микродвижки, трещины во льду, механические автоколебания, изгибно-гравитационные волны. Особенности исследуемых явлений взаимодействия в системе атмосфера–лед–океан могут рассматриваться как прогностические признаки появления экстремальных событий в дрейфующем ледяном покрове СЛО.

Ключевые слова: дрейфующий морской лед, волны, автоколебания, разрушение льда, спутниковые изображения.

ВВЕДЕНИЕ

В существующих моделях динамики дрейфующих льдов СЛО основными параметрами являются: вектор скорости ветра, касательные напряжения на границах воздух–лед и лед–вода, горизонтальная составляющая отклоняющей силы вращения Земли, проекция силы тяжести на поверхность моря, горизонтальная составляющая приливообразующей силы, сила взаимодействия между ледяными полями, плотность и толщина льда [Гудкович, Доронин, 2001]. Выявление причинно-следственных связей динамических процессов в системе атмосфера–лед–океан, необходимых при совершенствовании моделей прогнозирования состояния льдов, одна из приоритетных задач в проблеме погоды и климата. Учесть массы и скорости льдин отдельно при их взаимодействии практически невозможно, поэтому прибегают к инструментальным измерениям вектора скорости дрейфа льда, относительных деформаций и напряжений во льду, которые позволяют оценивать силу взаимодействия, выявлять прогностические признаки как параметров дрейфа, так и время возможного разлома льда [Легеньков, 1988; Смирнов, 1996; Wadhams, 2000]. Значительные ускорения при подвижке льдов возникают при сжатии, при сравнительно кратковременных взаимодействиях ледяных полей, сопровождающихся ударами, сдвигом и торошением по протяженным контактам ледяных полей. Характеру относительных деформаций и разломов во льду способствует неоднородность характеристик мезомасштабной прочности ледяного покрова океана.

В настоящее время подходы, основанные на получении длительных рядов инструментальных данных о крупномасштабной механике льда, позволяют получить достоверную физическую основу для объяснения природы ледовых явлений, которые

во время дрейфа возникают часто без видимой связи с локальными гидрометеорологическими параметрами. Поэтому при описании процессов перестройки структурных связей разного масштаба принимаются во внимание циклические изгибы льда от волн зыби и внутренних волн, периодические подвижки приливного характера, масштабные автоколебательные процессы. Намечены подходы развития теоретических основ явления самоподобия и самоорганизации морских льдов [Смирнов, Чмель, 2006]. Получению новых данных посвящен цикл исследований крупномасштабной физики и механики льда, проводимых на дрейфующих станциях «Северный полюс». Инструментальные данные отклика ледяного покрова на динамические процессы в океане и атмосфере и параметры собственных процессов во льдах подвергаются соответствующей обработке для выявления причинно-следственных связей и получения прогностических элементов. Получены новые данные о свойствах и механических характеристиках ледяного покрова, в том числе масштабной прочности льда. Эти инструментальные наблюдения на ледяных полях и сопутствующие им спутниковые изображения льда создают подходы к объяснению природы мезомасштабных мозаичных образований на поверхности СЛЮ. Развитию этой концепции и выявлению предикторов для использования в прикладных ледовых и океанологических задачах посвящены научные исследования на дрейфующих льдах. Один из примеров физико-механического развития экстремального события на дрейфующей станции «Северный полюс-38» приводится ниже.

МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Дрейфующая станция «Северный полюс-38» располагалась на ледяном поле с размерами в поперечниках 6×10 км, представлявшем собой смерзшийся многолетний и однолетний лед. Толщины ровных участков ледяного поля превышали два метра. Наиболее высокие среднемесячные скорости дрейфа наблюдались в начале и в конце дрейфа и составляли около 0,5 км/ч (14 см/с). Максимальная скорость дрейфа зафиксирована 19 марта 2011 г. и составила 1,69 км/ч (47 см/с). Глубины океана во время дрейфа изменялись от 1400 м до 3400 м.

В экспедиционных условиях использовались маятниковые наклонометры СН-2 и электронно-молекулярные сейсмометры СМЕ-4011, регистрировавшие скорость смещения льда по трем компонентам: X , Y – горизонтальные, Z – вертикальная. Непосредственно на льду приборы устанавливались по схеме прямоугольного треугольника со сторонами 500 м. Сигналы от СН-2 и СМЕ-4011 круглосуточно с дискретностью 100 Гц регистрировались на цифровых носителях. При этом получались данные о вертикальных и горизонтальных смещениях во льду, о горизонтальных ускорениях ледяного поля при подвижках, об изгибных деформациях при волновых и колебательных движениях ледяной пластины, а также о сейсмоакустических импульсах при трещинообразовании в ледяном поле. Схемы расстановки датчиков позволяют определять скорости распространения упругих (продольных, поперечных, изгибных) и изгибно-гравитационных волн в широком частотном диапазоне.

Общая картина механики льда при дрейфе сопровождалась данными от GPS-приемников в лагере станции. При обработке исходных данных от наклонометров и сейсмометров использовались локальные метеорологические параметры, снимки БЛА (беспилотного летательного аппарата) и снимки NOAA района дрейфа станции СП-38. При обработке и анализе результатов использовались программы спектрально-корреляционного анализа и статистики. При этом принимались во внимание общие сведения из разделов механики и физики колебаний и волн в сплошных и дискретных средах.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Описание данных ледовых наблюдений за период 17–20 марта 2011 г.

Пример результатов обработки данных состояния льда за один из периодов наблюдений на дрейфующей станции СП-38 представлен на совместном с метеоданными графике. Прослеживается четкая связь между скоростью ветра и скоростью дрейфа (рис. 1, 2).

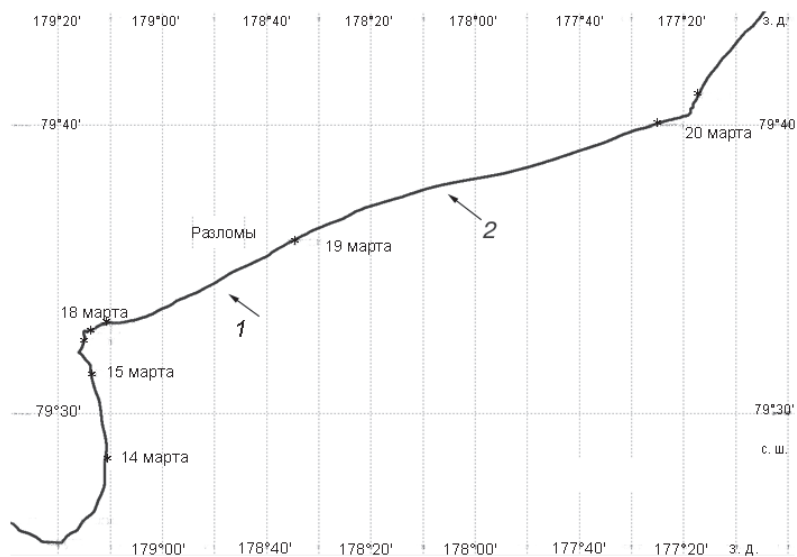


Рис. 1. Траектория дрейфа станции СП-38 до и после разлома ледяного поля: 1 – разлом; 2 – визуальное обнаружение сквозной трещины.

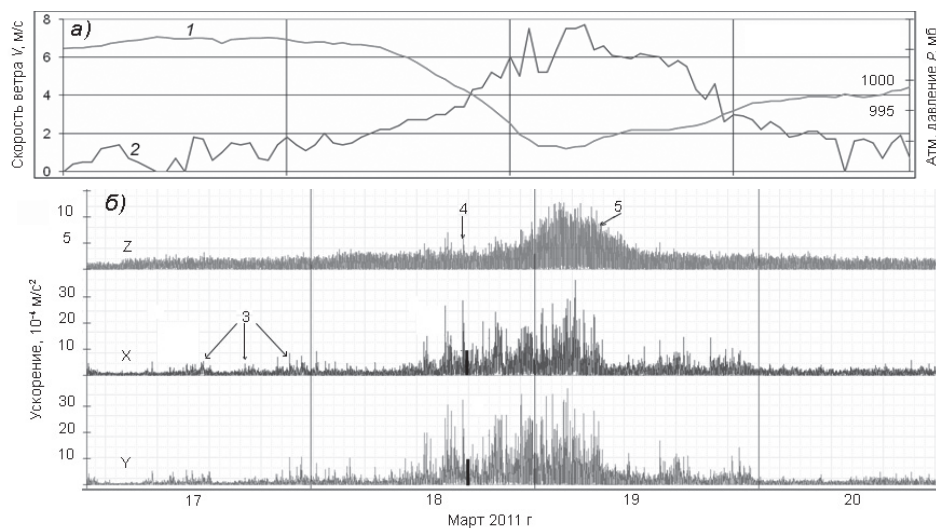


Рис. 2. Интенсивность динамического события в дрейфующем ледяном поле при сжатии и подвижках в период прохождения циклона 18–19 марта 2011 г. в районе СП-38:

а) 1 – атмосферное давление, 2 – скорость ветра; б) Z – вертикальная и X, Y – горизонтальные компоненты ускорения льда; 3 – импульсы подвижки, 4 – время автоколебания и разлома, 5 – изгибно-гравитационные волны.

Динамический процесс начался 17 марта с появления во льду импульсов X , Y , характеризующих горизонтальные микроподвижки льдов (рис. 3). Можно выделить основные характеристики импульсов при подвижке: четкая горизонтальная направленность, длительность до 8 с, цикличность/периодичность появления импульсов достигает нескольких минут. Как правило, импульсные подвижки заканчивались затухающим процессом с устойчивым в течение нескольких минут периодом. Следует обратить внимание на факт резкого ослабления интенсивности горизонтальных подвижек 19 марта в 10 часов, хотя скорость ветра продолжала оставаться в пределах 8–6 м/с. В это же время заметно уменьшался уровень изгибно-гравитационных волн с периодами до 17 с.

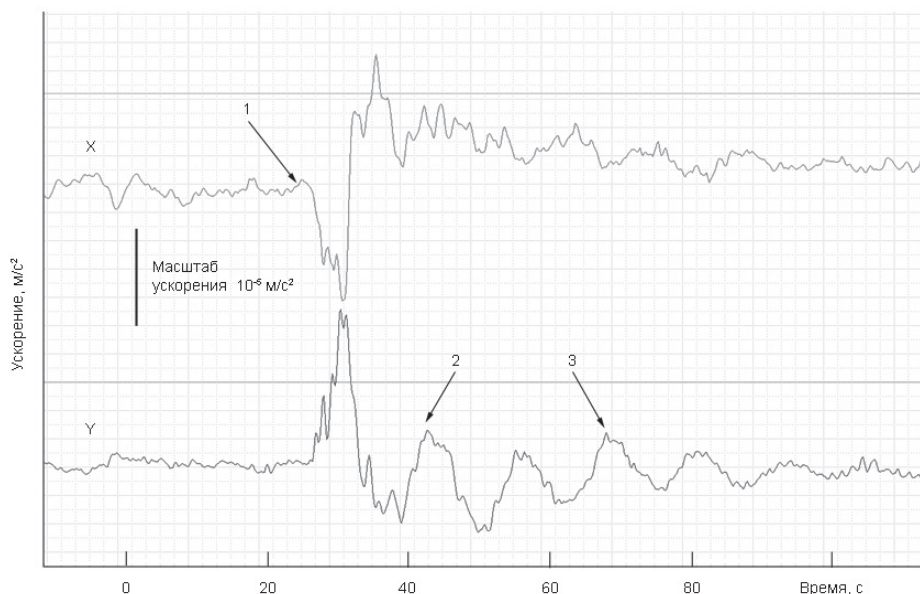


Рис. 3. Типичный импульс горизонтальной подвижки ледяного поля. Запись 17.03.2011 от двух наклономеров X , Y в одной точке, ориентированных под углом 90° . 1 – импульс горизонтальной подвижки льда; 2, 3 – колебания с периодом 16 с.

18 марта в 14:30 при описанной ситуации были зарегистрированы первые интенсивные сигналы горизонтальных подвижек, которые можно считать откликом на масштабные сдвиговые деформации. Очевидно, что в этот же временной интервал образовались первые трещины в ледяном поле станции. Из-за погодных условий трещина была визуально обнаружена только на следующий день 19 марта: через весь лагерь проходила трещина шириной около 10 см.

Вертикальные смещения льда в диапазоне изгибно-гравитационных волн возникли на пике скорости ветра, но значительно позже горизонтальных импульсов и появления трещины (рис. 1 и 2). Максимальная амплитуда волн с периодом 14–17 с достигала нескольких миллиметров. В дальнейшем интенсивность изгибно-гравитационных волн при скорости ветра 6 м/с существенно снизилась.

Наиболее важными для понимания механики разлома являются данные процессов с записями пилообразного характера, когда соотношение времени роста и падения амплитуды колебаний достигало 1,5. Например, 18 марта при подвижках

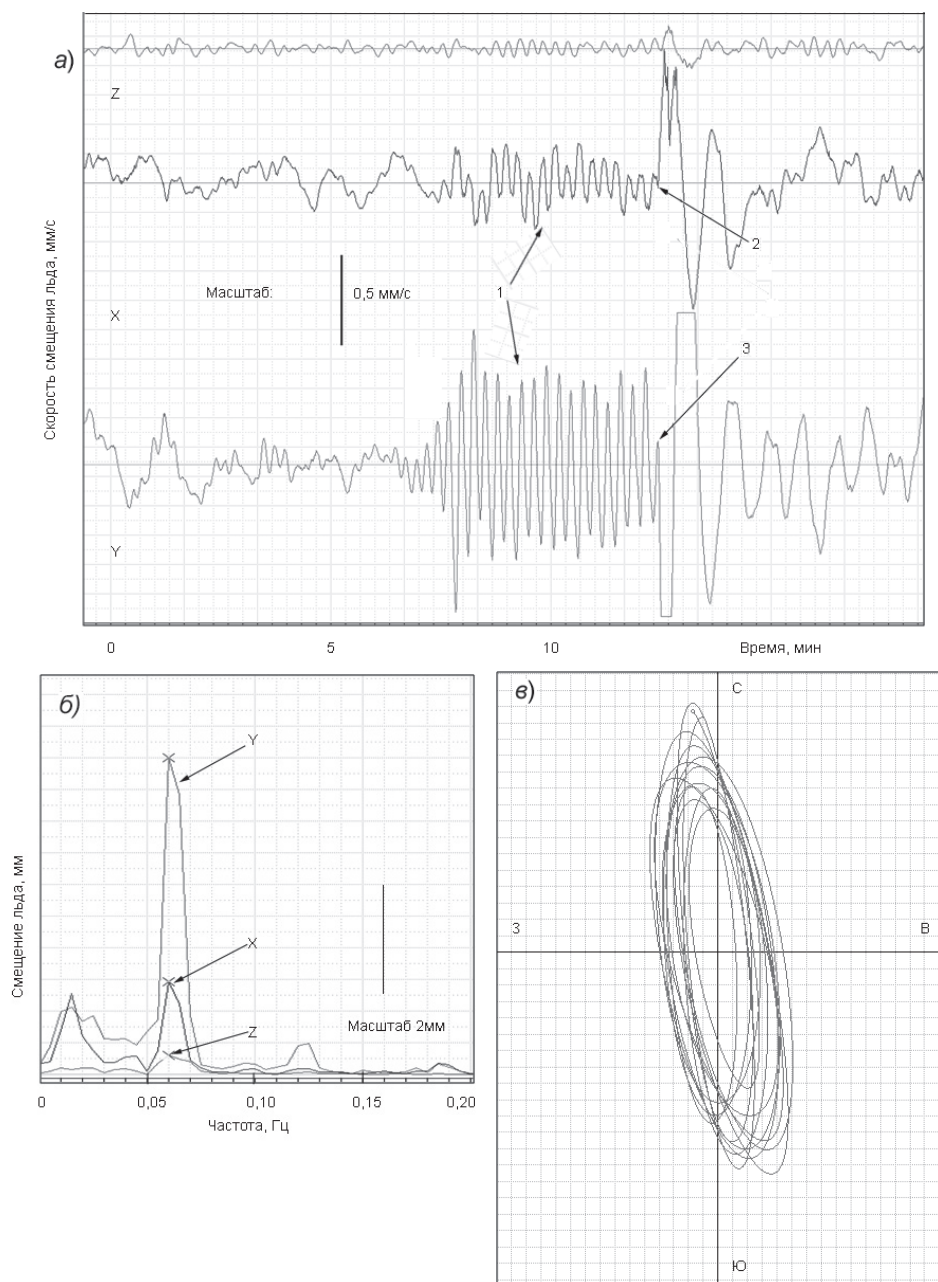


Рис. 4. Автоколебательный процесс в дрейфующем ледяном поле СП-38 (18 марта) при сжатии: а – фрагмент записи; 1 — автоколебания, 2, 3 — сдвиг $X Y Z$; б – амплитудный спектр компонент X, Y, Z ; в – поляризация колебаний в горизонтальной плоскости X, Y .

льда это соотношение составило 1,26 (при росте амплитуды 9,6 с и спаде – 7,6 с). Очевидно, что такие процессы при периодичности циклов в 16 с относятся к разряду нелинейных автоколебаний (рис. 4). В период появления таких процессов автоколеба-

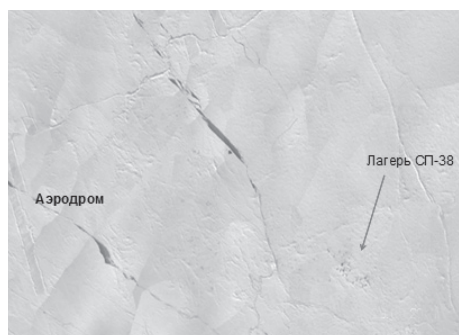


Рис. 5. Снимок ледяного покрова 23.03.2011 г. с высоты 500 м района дрейфующей станции СП-38. Видны нарушенная взлетная полоса, свежие разводья; подвижки с образованием разводий произошли 18–19 марта (см. рис. 2).

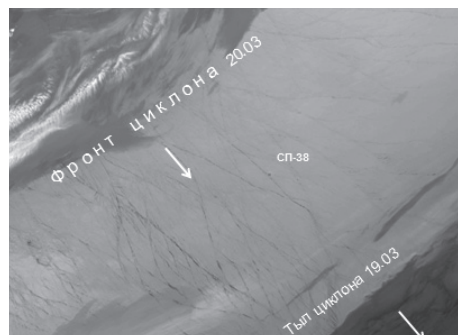


Рис. 6. Упорядоченная структура ледяного покрова в районе дрейфа станции СП-38 после события сжатия и разлома ледяного покрова при прохождении циклона 19 марта 2011 г. Снимок NOAA, 20 марта 2011 г.

тельного характера в ледяном поле образовались сквозные трещины и относительные сдвиговые деформации стенок трещины со сжатием.

На фотоснимке беспилотного летательного аппарата (БЛА) в последующие дни хорошо видны разводья при сдвиговых деформациях в ледяном массиве (рис. 5).

До и после событий сжатия и разлома ледяного покрова были рассмотрены снимки NOAA ледяного покрова района дрейфа СП-38. Для обработки рисунка структуры льда и определения углов пересечения образовавшихся каналов использовалась методика фрактальной размерности. В упорядоченной структуре льда размер стороны мезомасштабных «ромбов» составлял 100–200 км, острые углы ромба не превышали 30° (рис. 6).

Присутствие развитых структур во льдах СЛО, перекрещивающихся прямолинейных трещин и разводий указывает на вероятность образования относительно быстрых деформаций на больших площадях поверхности океана. Протяженные ледовые ромбовидные образования имеют углы пересечения разрывов в сравнительно узком диапазоне ($30\text{--}40^\circ$). Описанные явления являются основными факторами для подхода к объяснению природы образования полигональной структуры ледяного покрова.

Согласно рис. 2 можно считать, что динамические процессы в ледяном поле закончились 19 марта в 12 часов; продолжались незначительные горизонтальные подвижки разрушенного трещинами массива льда при слабом ветре (рис. 5). В дальнейшем станция СП-38 оказалась между двумя циклонами; 20 марта фоновые значения динамики льда были минимальные (рис. 2).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Классификация основных механизмов разрушения льда содержит: разрывы при термических напряжениях, наклоны льда и образование трещин, вызванных совместным действием ветра и течений; изгиб льда волнами зыби, образующими параллельные трещины; изгиб при потере устойчивости формы ледяной пластины при сжатии и упруго-пластическом деформировании; смятие и дробление льда при торошении. При сжатии и торошении процесс разрушения льда сопровождается смятием, дроблением, изгибом, сдвигом. Выделяются следующие масштабы де-

формирования и разрушения льда: развитие микротрещин (масштаб меньше 1 м); трещины размером десятки-сотни метров (локальный масштаб); трещины и разводья (1–100 км, мезомасштаб); протяженные сдвиговые разломы в ледяном покрове (до 1000 км, макромасштаб) [McNutt, Overland, 2003].

В проблеме прочности льда и масштабного фактора ключевыми являются напряжения в ледяном покрове, их предпочтительнее называть прочностью льда, которая может уменьшаться на два-три порядка по величине, когда размер зоны разрушения ледяного покрова существенно увеличивается. Это хорошо подтверждается инженерными работами по изучению механики разрушения льда и по определению ледовых нагрузок на широкие шельфовые сооружения. С увеличением размеров площади контакта льда и сооружения реализуемая прочность льда оказывается на два-три порядка меньше, чем прочность при испытаниях образцов льда. Характер динамического взаимодействия ледяных образований между собой и с сооружением имеет общие черты. В этих случаях отмечается подобие форм деформирования и разрушения льда: при малых относительных скоростях движения лед ведет себя как пластическое тело, при больших – как хрупкое.

Самоподобная размерность изрезанных линий гряд торосов и скрытых трещин в ледяном покрове может являться следствием реализации модели Кулона–Мора, согласно которой разрушение среды на сдвиг происходит в том случае, когда касательные напряжения достигают критической величины. В этом случае параметры мезомасштабной прочности льда могут выражаться через силу сцепления и угол внутреннего трения на линиях скольжения льда как связно-сыпучей среды.

Событие 18–19 марта на станции СП-38 породило вертикальные смещения льда в диапазоне изгибно-гравитационных волн (рис. 2). Пик интенсивности волн соответствовал пику скорости ветра 8 м/с; интенсивность волн при скорости ветра 6 м/с существенно снизилась. Колебания возникли значительно позже появления горизонтальных импульсов и трещин. Этот факт позволяет предположить существование пространства открытой воды, на которой во время штормового ветра возникло волнение. Образовавшиеся волны могли распространяться под ледяным покровом на десятки и сотни километров. На дрейфующей станции они были зафиксированы сейсмометрами с периодом 14–17 с.

Известно, что физико-механические процессы во льдах сопровождаются образованием изгибно-гравитационных волн, возникающих не только от волн на открытой воде, но и от воздействия ветра, при торошении льдов. Свободные волны зыби во льдах от далеких штормов могут иметь амплитуду несколько сантиметров при длине волны 1000 м. Слабое затухание ледовой зыби позволяет регистрировать ее за тысячу километров от штормовых районов в Атлантике или в Баренцевом море. Согласно теории резонансного возбуждения волн ветром пик интенсивности изгибно-гравитационных волн совпадает с пиком скорости ветра.

Как уже указывалось, ледовые процессы на записях пространственно разнесенных по ледяному полю приборов носят пилообразный характер, соотношение времени роста и падения амплитуды колебаний достигало 1,5. Такие процессы относятся к разряду нелинейных автоколебаний (рис. 4). Именно в период появления автоколебаний и горизонтальных подвижек создалась ситуация, когда появились трещины и разломы.

Для поддержания автоколебаний не требуется внешних периодических воздействий. Источником энергии ледовых автоколебаний являются силы сжатия, обуслов-

ленные ветром и поверхностными течениями океана. Демпфирующим механизмом служат силы трения и сцепления на стенках трещины/разрыва во льду. Подобный механизм возникает на контакте морского льда с вертикальной опорой сооружения или с айсбергом. Процесс взаимодействия характеризуется регулярной повторяемостью накопления и сброса напряжений, отражая релаксационные свойства льда в масштабе наблюдений.

Подобные ледовые процессы характерны для автоколебаний в системах со сжатием, смещением и трением по сжатой сквозной трещине. Стабильность частоты в спектре и четкая поляризация во время процесса автоколебаний позволяют предположить возникновение протяженного сдвига в горизонтальной плоскости. Наблюдаемые на СП-38 процессы были аналогичны слабому землетрясению 3–4 балла по шкале Рихтера.

Генерация таких механических колебаний, период и амплитуда которых не зависят от характера внешнего воздействия, обусловлена свойствами самой ледовой системы. Длительность и интенсивность автоколебательных подвижек с трением по разрыву во льдах характеризуют реологию льда, механику его разрушения, формируя при этом структуру излучаемых упругих волн. Периодические пульсации ледяного поля могут превратиться в квазигармонические автоколебания – процесс стабильного скольжения с трением по разрыву. Длительность автоколебательных процессов достигает десятков минут, в спектре при этом устойчиво сохраняются низкочастотные пики колебаний (рис. 4). Распространяющиеся от ледового эпицентра упругие волны в диапазоне частот 0,2 – 1,5 Гц являются одним из основных признаков происходящего процесса сжатия.

Переход от разрывных колебаний к почти синусоидальным зависит от относительной скорости смещения стенок разрыва во льду. Записи периодической горизонтальной подвижки по разрыву во льдах при сжатии иллюстрируют известное в технике и сейсмологии явление *stick slip*. Автоколебания могут быть использованы для разработки технологии оценки силы сжатия и прогноза разлома и торошения. Процесс автоколебаний – яркий пример явления самоорганизации в хаосе временных ледовых событий.

Оценки горизонтальных смещений и ускорений льда позволяют определять силы взаимодействия льдов вдоль траектории дрейфа [Шейкин и др., 2008]. Величина энергии подобных динамических процессов при сравнительно малых ускорениях пока не поддается оценке из-за трудности определения массы и относительной скорости взаимодействующего льда, но очевидно, что эффекты такого взаимодействия могут объяснить многие природные явления и способствовать решению практических задач по воздействию льда на инженерные сооружения в Арктике.

ВЫВОДЫ

– На основе инструментальных наблюдений за физико-механическим состоянием ледяного поля дрейфующей станции «Северный полюс-38» получены длительные временные ряды параметров реакции ледяного поля на события сжатия и разлома. При обработке данных и анализе результатов использованы метеопараметры района наблюдений, снимки ИСЗ и БЛА.

– Выявлены периодические процессы микроподвижек льда, регистрируемые в ледяном покрове как механические горизонтально-поляризованные импульсы ускорения длительностью от 3 до 10 с. Новые данные об опережающем явлении периодических микроподвижек льда перед событием сжатия и разлома позволяют подойти к разработке краткосрочного (до 20 часов) метода прогноза сжатия и торошения льдов.

– Явление механических автоколебаний в ледяном покрове при сжатии льдов является одним из основных предикторов крупномасштабных событий сжатия и разлома льда сдвигом. По параметрам напряжений во льду и ускорений при подвижке могут быть выполнены оценки силы взаимодействия ледяных полей при сжатии.

– Показано, что при процессах сжатия и разлома льда возникают изгибно-гравитационные волны, зарождающиеся как при штормовом ветре, так и при штиле. Спектральный пик изгибно-гравитационных волн находится в диапазоне периодов 14–17 с. Предполагается, что эпицентром этих волн является образовавшееся обширное развье на удалении нескольких десятков километров от ледового лагеря СП-38.

– Наблюдения за физико-механическими процессами в ледяном покрове на дрейфующих станциях «Северный полюс» открывают большие возможности для получения новых результатов в полярной океанологии: совершенствование моделей дрейфа льдов, мониторинг поверхностных и внутренних волн океана, прогноз сжатия льдов, обнаружение района протяженных разломов и разводий – важных факторов при решении климатических и инженерных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гудкович З.М., Доронин Ю.П. Дрейф морских льдов. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 110 с.
- Легеньков А.П. Подвижки и приливные деформации дрейфующего льда. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 104 с.
- Смирнов В.Н. Динамические процессы в морских льдах. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 162 с.
- Смирнов В.Н., Чмель А.Е. Самоподобие и самоорганизация в дрейфующем ледяном покрове Арктического бассейна // Доклады Академии наук. 2006. Т. 5. С. 684–687.
- Шейкин И.Б., Смирнов В.Н., Ковалев С.М. Оценка возможностей спутниковых навигационных измерений для изучения кинематики и динамики морского льда (по данным российских дрейфующих станций «Северный полюс») // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 2 (79). С. 31–43.
- McNutt S.L., Overland J.E. Spatial hierarchy in Arctic sea ice dynamics // Tellus. Ser. A. 2003. Vol. 55(2). P. 181–191.
- Wadhams P. Ice in the ocean. Gordon and Breach Science Publishers, 2000. 351 p.

V.N.SMIRNOV, L.V.PANOV, V.T.SOKOLOV

DYNAMICS OF THE FRACTURE PROCESS OF THE DRIFTING ICE FIELD OF THE STATION “NORTH POLE-38”

Results of study of physical-mechanical process during compression and fracture of the ice field at the drifting station “North Pole-38” are discussed. The data of the observation of velocity, displacement and acceleration of the ice during a few months are presented. Processes of typical event caused by interaction of ice fields during which primary microshearings, cracks in the ice, mechanical self-excited oscillations and flexural-gravity waves are described. Features of this phenomena of interaction in the system atmosphere–ice–ocean can be considered as possibility of appearance of extreme events in the ice cover in the Arctic Ocean.

Keywords: drifting sea ice, waves, self-excited oscillations, fractures of ice, satellite images.